

高湿面に接触する液粒の蒸発と燃焼に関する研究

著者	田村 善助
号	6
発行年	1958
URL	http://hdl.handle.net/10097/8749

氏 名	た 田 もら 村 せん 善 すけ 助
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭和 33 年 10 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 精密工学専攻

学 位 論 文 題 目	高温面に接触する液粒の蒸発と燃焼に 関する研究
-------------	----------------------------

指 導 教 官	東北大学教授	棚 沢 泰
論 文 審 査 委 員	東北大学教授	棚 沢 泰
	東北大学教授	佐 藤 健 児
	東北大学教授	桜 井 武 麿

論文内容要旨

1. 緒 言

ドイツの MAN 社では、同社の直接燃焼室式ディーゼルエンジンのピストンの頂部に半球形の凹みを作り、上部の急斜面にホール自動弁から2本の高速燃料流をあてる M 式ディーゼルエンジンを製作して爆音を低め、平均有効圧力を高めることに成功した。爆音の低下と平均有効圧力の上昇の原因としては、噴霧流が凹みの壁に激しく衝突して膜状に拡がり、蒸発燃焼を行つてゐるためだといわれているが、果してどのような条件の下に燃焼が行われているのかまだはつきり解つていない。またガスタービン用燃焼器でも、アメリカのものは渦巻噴射弁の噴射圧が低いために、燃料の微粒化が悪く、従つて燃焼効率が下るものと普通考えられているが、実際は燃焼効率が下つていない。これは粗い燃料粒が内筒壁に集滴して内筒壁の所で蒸発燃焼を行つてゐるためと考えると説明がつく。

同様にイギリスのジェットエンジンのステッキ形蒸発燃焼器でも蒸発管と燃料間の熱移動が問題となつてゐる。

これらの問題は結局液粒が高温物体の面に接触した際の蒸発と燃焼の問題と見做すことができる。

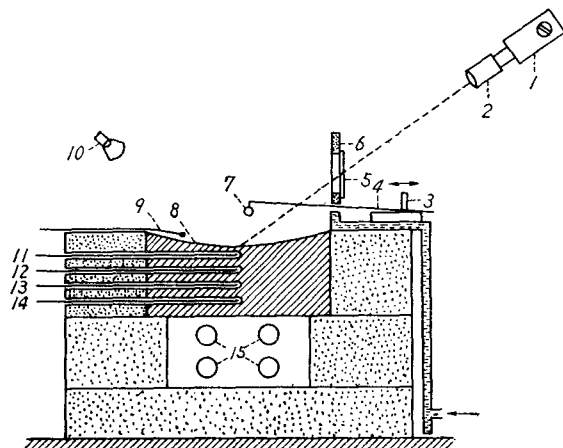
そこで筆者はこれらの問題を基本的に解決するために高温面に純粋燃料、実用燃料、潤滑油の液粒を接触させ、その液粒の蒸発および燃焼現象を写真的に明らかにし、定量的に解析することができた。

2. 実 験 装 置

第1図が実験装置である。図中の8は凹面研磨したステンレス盤で、これを下からシリコニト発熱体 15 によつて加熱し、液粒落下装置 3, 4, 7 を動かして液粒を盤の中央に落して液粒の蒸発又は燃焼して消失する時間を、消失時間が長い場合にはストップオッチで、短い場合には 16 ミリ撮影機 1, 2 で測定する。盤の表面温度は盤中に熱電対 11, 12, 13, 14 を4本等間隔に挿入して外挿法で求め、空気の温度は盤上 5mm 離れた所にある熱電対 9 で測定した。10 は写真撮影用のレフレクターランプである。液粒は先を溶かして球状にしたニッケル線 7 の先に取り付けられ、ハンドル 3 を押出して凸起 4 がベットの端にくると凸起がベットからはずれ、その時の衝撃で落下する。

第2図は写真撮影用装置で、高温面として凹面ステンレス盤の代りに凹面石英板を使用し、その上に第1図と同様な液粒落下装置によつて液粒を落下し、下から光をあて、液粒の蒸発並びに燃焼状態を 16 ミリ撮影機で連続的にシルエットとして撮影する装置である。

実験に使用した液体は純粋燃料のペンゼン、ノルマル・ヘプタン、イソ・オクタン、ノルマル・セタン、 α -メチ



第1図 実験装置

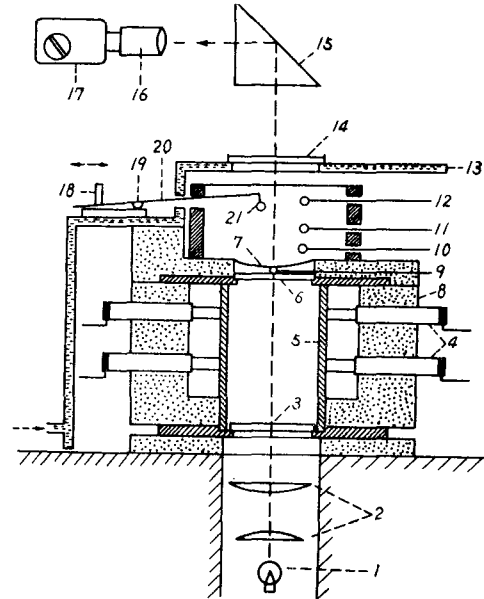
ル・ナフタレン，エチル・アルコール，蒸留水，実用燃料のガソリン，軽油，A重油，潤滑油のモビール・オイルの 11 種類である。

3. 実験結果

第3図は粒径 $d_0=2.14\text{ mm}$ のベンゼンの液粒がステンレス盤上に接触した瞬間から消失を完了してしまうまでの消失時間とステンレス盤の表面温度 θ_s との関係をあらわしている。図から

明らかなように表面温度 θ_s の変化によつて液粒の消失時間には極大値，極小値があり，表面温度 θ_s によつて各々異つた蒸発及び燃焼状態があらわれるが，第4図にその種々の代表的状態を模型的に示した。

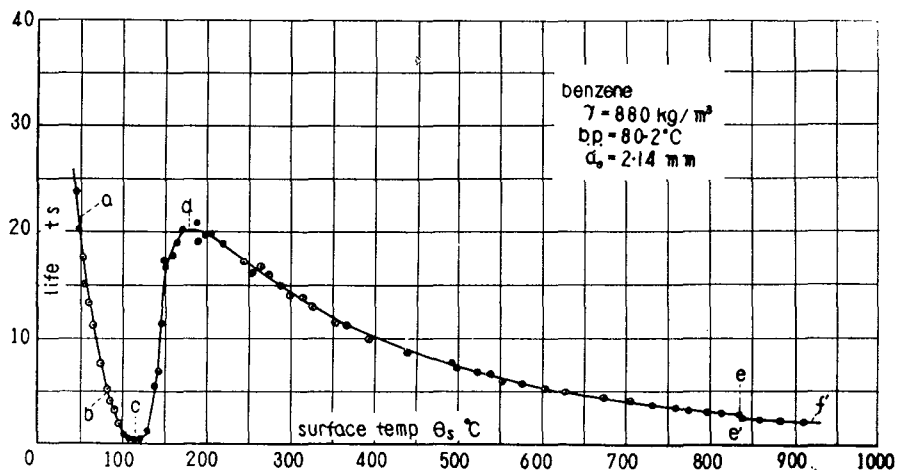
ステンレス盤の表面温度 θ_s が室温から沸点 θ_b までの間に於ては，落下した液粒は盤面上に凸レンズ状，すなわち第4図の (a) のように拡がり，時間の経過と共に凸レンズ状のまま接触面積も高さも比例的に減少して蒸発を完了する。この期間は第3図の a-b 間に相当し，液膜のまま蒸発を完了するので液膜蒸発期間と名付ける。この期間に於ては表面温度 θ_s の上昇と共に消失時間は一方的に減少する。盤の表面温度 θ_s が室温から沸点より 5°C 低い表面温度 θ_s に於ては，落下した液粒は凸レンズ状に拡つて落下地点から動かないが， $(\theta_b-5)^\circ\text{C}$ の表面温度から沸点 θ_b の表面温度の区間に於ては落下した液粒は凸レンズ状のまま盤面上を變形，移動し，表面温度 θ_s が高くなればなる程



第2図 写真撮影用実験装置

變形，移動が激しくなる。

表面温度 θ_s が沸点 θ_b 以上になると落下した液粒は形のくずれた凸レンズ状の液膜となり，その中に蒸気泡を発生する。表面温度 θ_s が高くなるに従つて，蒸気泡の発生が多く，激しくな



第3図 ベンゼンの消失時間曲線

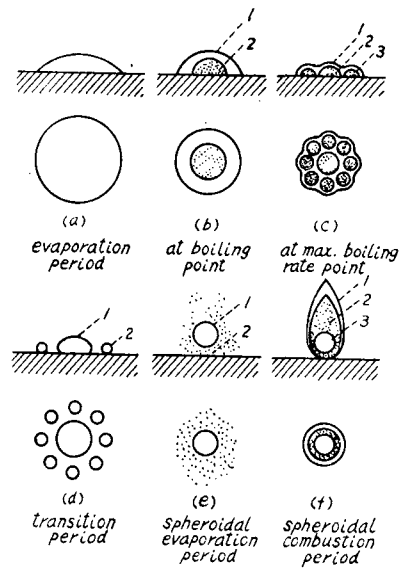
り凸レンズ状の液膜の形はほとんどくずれる。表面温度 θ_s が更に高くなると、液膜が蒸気泡の発生、生長、破壊によつてこわれ、その時ジュツという微かな音をたてる。表面温度 θ_s が C 点に達すると、液粒は落下と同時に前よりも大きい音を発し、液を落下地点から少量四方にはねとばし瞬間的に蒸発する。C 点が最も蒸発時間が短いのでこの点を最大蒸発率点と名付ける。第3図の b-c 間に於ては液膜中に沸騰現象が見られるので、この期間を沸騰蒸発期間と名付ける。沸騰蒸発期間に於ても液膜蒸発期間と同様に表面温度の上昇と共に消失時間が短くなるが、消失時間曲線の勾配は液膜蒸発期間に比べて大きい。最大蒸発率点 C に於ける消失時間は 1 秒以内という極めて短時間である。第4図の (b) が沸騰蒸発期間初期の蒸発状態、(c) が最大蒸発率点に於ける蒸発状態である。

表面温度 θ_s が最大蒸発率点 C より高くなると、液粒は落下と同時に大きな球 1 個と、中、小球数個に分れる。大きな球は完全な球とならず下半部が欠けたような球で、しばらくするとつぶれて瞬間的に蒸発する。

しかし中、小球は完全な球となつて盤上を左右前後に動き廻り、その結果消失時間が長くなる。表面温度 θ_s が更に高くなると、大、中、小球に分れる現象は同じけれども、大きな球が段々完全な球に近くなり、中、小球に分れる量が少くなる。大きな球が段々完全な球に近くなると球の存命時間が長くなるために液粒の消失時間は長くなる。表面温度 θ_s が d に達すると液粒の分裂が見られなくなり、液粒は落下と同時に球状になり、消失時間が極大になる。この現象は 1756 年にライデンフロストによつて発見されていたので d 点をライデンフロスト点と名付ける。第3図の c-d 間は沸騰蒸発期間から球状蒸発期間へ移る遷移期間で、同一表面温度 θ_s に対しても液粒の分裂状態が常に異り、消失時間の実験値にもばらつきが多く見られる不安定な期間である。第4図の (d) が遷移期間の蒸発状態である。

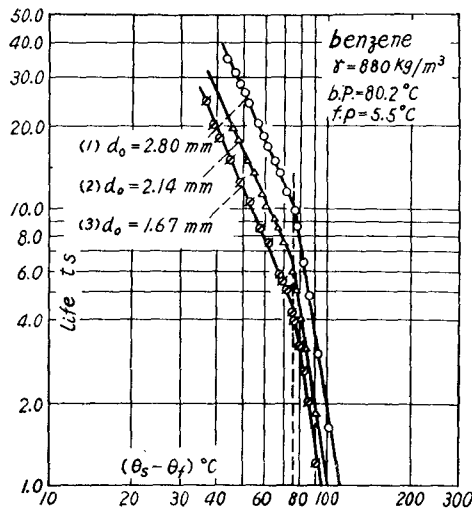
表面温度 θ_s がライデンフロスト点 d 以上の温度になると、液粒の分裂は全然見られず、液粒は落下と同時に盤面への衝撃で横軸の長い円体、次は盛上つて縦軸の長い円体、次は又横軸の長い円体という順序で変形する。数秒経つと変形がなくなつて完全な球になり、時間が経つにつれて球が小さくなる。又その後数秒経つと小さくなつた球が盤上で跳躍を始め、跳躍を繰返しながら蒸発を完了する。d-e 間が球状で変形、静止、跳躍の順序で蒸発して行くために球状蒸発期間と名付ける。この期間では表面温度 θ_s の上昇と共に消失時間がゆつくりと減少して行く。

燃料蒸気と空気の混合気の濃度が着火するのに十分な値となり、表面温度 θ_s と空気の温度 θ_a が着火に必要な温度に上昇すると、落下した液粒は着火する。e' が最低着火点である。e'-f' 間では球状で燃焼するために球状燃焼期間と名付ける。この期間に於ては液粒は落下と同時に球状蒸発期間と同様に球の変形が見られ、わずかな着火遅れがあつた後着火する。しかしこの期間には球状蒸発期間に見られるような球が小さくなつた時に跳躍する現象は見られなかつた。最低着火点 e' よりも表面温度 θ_s が上昇すると、着火遅れも液粒の消失時間も短くなる。液粒の消失時間曲線の球状蒸発期間 d-e の最終点 e と球状燃焼期間 e'-f' の開始点 e' とが不連続になつてゐるが、これは燃焼熱によつて液粒が加熱されるために e より e' の消失時間が短くなるためである。第4図の (e) は球状蒸発期間の蒸発状態で液粒 1 は自己の発生する蒸気 2 によつて高温面上に浮上るために高温面から液粒への熱伝達が減少し、従つて消失時間が長くなる。(f) は

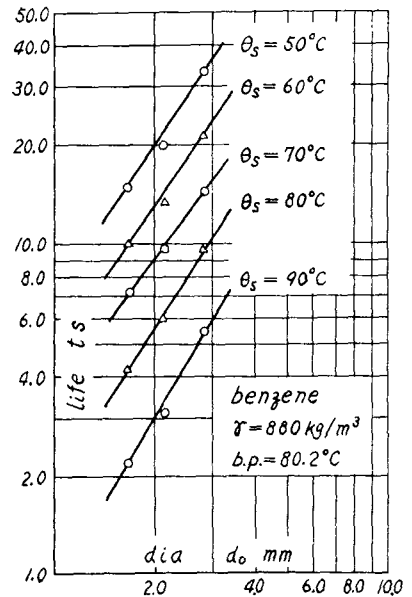


第4図 液粒が高温面に接した時の蒸発および燃焼状態の模型図

球状燃焼期間の燃焼状態で液粒3は火炎面1によつて取囲まれ、火炎面1と液粒3の間には液粒の蒸気2が充満している。このようにベンゼンのような純粋燃料に於ては、液粒が高温面に接触すると高温面の表面温度 θ_s によつて液膜蒸発期間、沸騰蒸発期間、遷移期間、球状蒸発期間、球状燃焼期間の5種の異つた蒸発及び燃焼現象を呈し、各期間はそれぞれ沸点、最大蒸発率点、ライデンフロスト点、最低着火点によつて区分されている。



第5図 (表面温度 θ_s —凝固点 θ_f) に対する消失時間曲線



第6図 粒径による消失時間の変化

第5図はベンゼン液粒の最初の粒径 d_0 を 1.67 mm, 2.14 mm, 2.80 mm と変へた場合の消失時間を d_0 をパラメータとして表面温度 θ_s とベンゼンの凝固点 θ_f との差 $(\theta_s - \theta_f)$ に対してプロットしたグラフであり、第6図は表面温度 θ_s をパラメータとし消失時間を d_0 に対しプロットしたグラフである。第5図、第6図から液膜蒸発期間の消失時間 t_1 と沸騰蒸発期間の消失時間 t_2 とはそれぞれ次の式であらわされる。

$$t_1 = k_b d_0^\alpha (\theta_b - \theta_f / \theta_s - \theta_f)^m \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$t_2 = k_m d_0^\beta (\theta_m - \theta_f / \theta_s - \theta_f)^n \quad \dots\dots\dots (2)$$

こゝに θ_b は沸点、 θ_m は最大蒸発率点、 α , β , m , n , k_b , k_m は定数である。 α , β の値をベンゼン、ノルマル・ヘプタン、イソ・オクタン、ノルマル・セタン、 α -メチル・ナフタレン、エチル・アルコール、蒸溜水の各純粋燃料について求めると、 α , β とも 1.5 となつた。 k_b は $d_0 = 1$ mm で高温面の表面温度 θ_s が沸点 θ_b になつた時の消失時間をあらわし、 k_m は $d_0 = 1$ mm で高温面の温度が最大蒸発率点の時の消失時間をあらわしている。各純粋燃料の t_1 , t_2 の実験式は次のように表示できる。

ベンゼン

$$t_1 = 2.12 d_0^{1.5} (\theta_b - \theta_f / \theta_s - \theta_f)^{2.3} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$t_2 = 0.13 d_0^{1.5} (\theta_m - \theta_f / \theta_s - \theta_f)^{6.9} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ノルマル・ヘプタン

$$t_1 = 1.75 d_0^{1.5} (\theta_b - \theta_f / \theta_s - \theta_f)^{5.2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$t_2 = 0.13 d_0^{1.5} (\theta_m - \theta_f/\theta_s - \theta_f)^{22.6} \dots\dots\dots (6)$$

イソ・オクタン

$$t_1 = 1.56 d_0^{1.5} (\theta_b - \theta_f/\theta_s - \theta_f)^{6.0} \dots\dots\dots (7)$$

$$t_2 = 0.12 d_0^{1.5} (\theta_m - \theta_f/\theta_s - \theta_f)^{23.3} \dots\dots\dots (8)$$

ノルマル・セタン

$$t_1 = 1.33 d_0^{1.5} (\theta_b - \theta_f/\theta_s - \theta_f)^{4.9} \dots\dots\dots (9)$$

$$t_2 = 0.17 d_0^{1.5} (\theta_m - \theta_f/\theta_s - \theta_f)^{17.3} \dots\dots\dots (10)$$

α -メチル・ナフタレン

$$t_1 = 2.06 d_0^{1.5} (\theta_b - \theta_f/\theta_s - \theta_f)^{5.8} \dots\dots\dots (11)$$

$$t_2 = 0.15 d_0^{1.5} (\theta_m - \theta_f/\theta_s - \theta_f)^{16.0} \dots\dots\dots (12)$$

エチル・アルコール

$$t_1 = 2.77 d_0^{1.5} (\theta_b - \theta_f/\theta_s - \theta_f)^{6.4} \dots\dots\dots (13)$$

$$t_2 = 0.16 d_0^{1.5} (\theta_m - \theta_f/\theta_s - \theta_f)^{15.3} \dots\dots\dots (14)$$

蒸 溜 水

$$t_1 = 7.40 d_0^{1.5} (\theta_b - \theta_f/\theta_s - \theta_f)^{4.0} \dots\dots\dots (15)$$

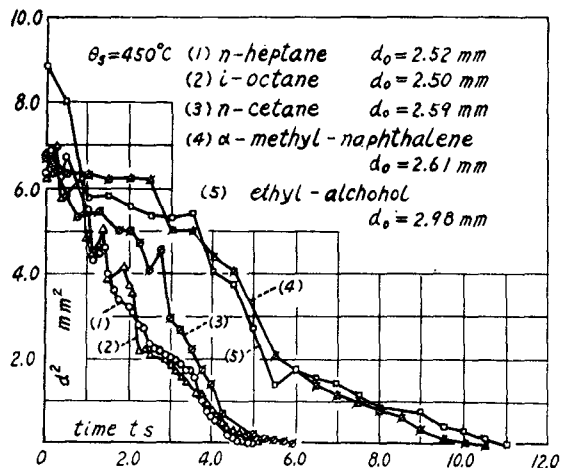
$$t_2 = 0.14 d_0^{1.5} (\theta_m - \theta_f/\theta_s - \theta_f)^{8.2} \dots\dots\dots (16)$$

一方各純粋燃料の最大蒸発率点 θ_m は

$$\theta_m = \theta_b + (27 \sim 57)^\circ\text{C} \dots\dots\dots (17)$$

となり、 $(\theta_m - \theta_b)$ は 1, 2 の例外を除くと比重に比例して大きくなっている。

球状蒸発期間に於ては液粒が落下して蒸発しきるまでに3段階の異つた現象を示す。すなわち第1段階は落下した液粒が盤面への衝撃と自重によつて落下直後は平たい液膜になり、その時高温面から急激に熱を受けて蒸気を発生し、縦軸の長い円体となり、次は横軸の長い円体、次は又縦軸の長い円体という順序で変化する過渡期間である。第2段階は液粒内の温度分布が均一になり、第1段階中の蒸発によつて自重が減少するために完全な球状になつて、高温面との間にできた薄い蒸気層の上につかつたまゝ盤面上を動きまわる段階である。第3段階は時間の経過と共に液粒の重量が減少して、蒸気層の厚さに比べて粒径が小さくなると、高温面からの熱伝達が低下し、そのため液粒からの蒸発量が減少する結果、蒸気層が薄くなつて液粒が高温面に近づく、すると高温面からの熱伝達が多くなつて蒸発量が多くなり液粒が上に押上げられるということを繰返すので、液粒は自然対流の影響と相まつて盤上を球状のまま跳躍する段階である。この段階に於ては跳躍によつて液粒が高温面から遠ざかつて、空気温度の低い場所に行く回数が多くなるために第2段階に比べて蒸発時間が長くなる。第7図は純粋燃料の球状蒸発期間に於ける時間に対する粒径の2乗 d^2 の変化のグラフである。粒径は複雑な形をしているものがあるので、写真から長径、短径をはかりその積を d^2 とした。このグラフ



第7図 球状蒸発期間に於ける粒径の2乗 d^2 の時間的变化

から前述した球状蒸発期間に於ける3つの異つた段階の現象がよく t に対する d^2 の変化の形であらわされている。すなわち第1段階は d^2 の変化が激しい期間に相当し、第2段階は勾配が一定になる期間に当り、第3段階は勾配が緩やかになっている期間に相当している。しかるに球状蒸発期間に於ては、液粒が第2段階にある時間が最も長いので、球状蒸発期間の消失時間は第2段階によつて支配されているものと見做すことができる。第2段階では勾配が一定であるから

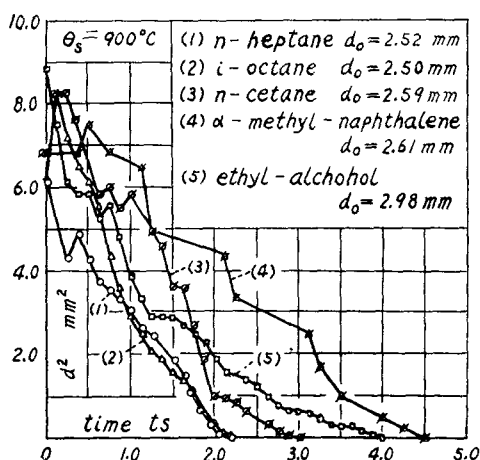
$$-d(d^2)/dt = \text{一定} = C_e \dots\dots\dots (18)$$

の関係が成立し、一定数を C_e であらわす。 C_e は時間 t に対する d^2 の勾配をあらわし、この大小によつて蒸発が早く行われるか、遅く行われるかの尺度となるためにこれを蒸発速度係数と名付ける。 C_e のディメンションは mm^2/s である。液粒が高温面に接触してから t 時間経過した時の粒径 d は次式であらわされる。

$$d^2 = d_0^2 - C_e t \dots\dots\dots (19)$$

この法則は先に石英糸に液粒を懸吊して高温空气中で蒸発させた実験で見出された法則と一致している。このことは球状蒸発期間に於ける液粒の蒸発は高温空气中で液粒が蒸発する時の現象と同じいことを意味している。高温面に液粒が接触した時の蒸発速度係数 C_e と静止せる高温空气中に於ける液粒の蒸発速度係数 C_s とを比較すると、前者の方が約3倍大きな値を示している。このことは高温面に液粒が接した場合には高温面の存在によつて静止高温空气中よりも液粒への熱移動が大きく、又前者には自然対流があるが、後者には自然対流がないために、液粒への熱伝達は前者が大きいので前者の蒸発速度係数 C_e が大きくなつてあらわれたのである。

球状燃焼期間に於ては、落下した液粒は球状蒸発期間と同様落下による盤面への衝撃と自重と液粒内の不均一な温度分布のため、平たい液膜状、次に縦に長い円体、次は横に長い円体、次は又縦に長い円体という順序の変化を行う。液粒が変形している時に、液粒から蒸発して外側に拡散する燃料蒸気と、空気との混合気の濃度が適当な混合比となり、しかもその温度が燃焼温度に達すると着火する。その場合着火は燃料蒸気の拡散域全域にわたつて着火するが、その後は液粒の外側の火炎面で燃焼が行われ、拡散域では着火が起らない。球状燃焼期間に於ける液粒の運動は、液粒が小さくなくても跳躍の現象が起らないという事以外は球状蒸発期間の運動と同様である。第8図は球状燃焼期間に於ける粒径の2乗 d^2 の時間 t に対する変化をあらわしているグラフである。これによる



第8図 球状燃焼期間に於ける粒径の2乗 d^2 の時間的変化

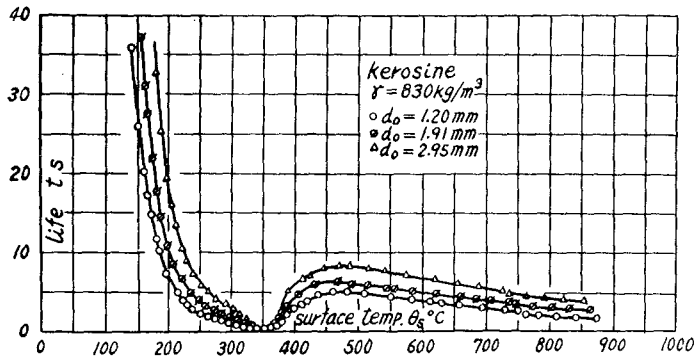
と d^2 は t の経過と共に直線的に減少しているので球状蒸発期間の場合と同様に

$$-d(d^2)/dt = \text{一定} = C_b \dots\dots\dots (20)$$

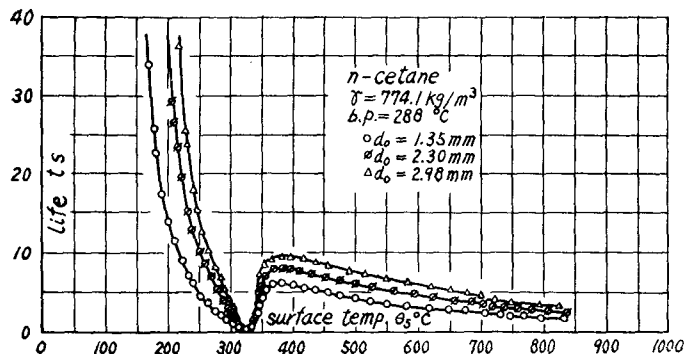
$$d^2 = d_0^2 - C_b t \dots\dots\dots (21)$$

という関係が成立する。そして一定数 C_b を燃焼速度係数と名付ける。 C_b のディメンションは mm^2/s である。それ故に球状燃焼期間に於ける液粒の燃焼は、先に石英糸に液粒をつけて高温空气中で燃焼させた実験に於て見出された関係と一致している。高温面に液粒が接触した場合の C_b と静止高温空气中にて液粒が燃焼した場合の C_s を比較すると、前者が同一温度で約2倍大きい値を示している。これも亦高温面の存在と自然対流の影響によるものである。第8図に於て

d^2 が周期的に変化しているのは、液粒の粒径自身の変化ではなく、石英板の凹みのためである。すなわち液粒が石英板の中央にくると写真の倍率が小さくなり、石英板の端にくると倍率が大きくなる。この液粒の石英板上を中央から端へ、端から中央へと周期的に動きまわる現象は石英板のみならずステンレス盤にも見られる。若し高温面に凹みを作らず水平面に仕上げておくと、球状蒸発期間、球状燃焼期間の液粒は平面上を一方方向に移動して面外に転り落ち実験が不可能になる。



第9図 ノルマル・セタンの消失時間曲線



第10図 軽油の消失時間曲線

C_a も C_b も表面温度 θ_s の上昇と共に増大する。

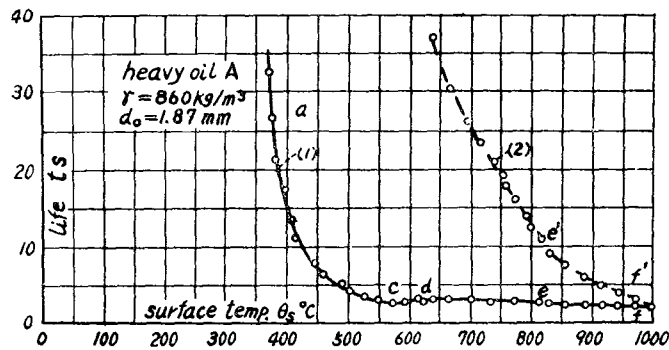
第9図はノルマル・セタンの粒径 $d_0=1.35$ mm, $d_0=2.30$ mm, $d_0=2.98$ mm の時の消失時間曲線である。各純粋燃料も亦粒径の変化に対して同様な消失時間曲線を示している。これらによると最大蒸発率点、ライデンフロスト点は同一燃料に於ては粒径に無関係に一定であるが、最低着火点は同一燃料に於ても粒径によつて変つてゐる。このことは最低着火点の低いノルマル・セタン、ノルマル・ヘプタンに於ては顕著であるが、最低着火点の高いベンゼン、イソ・オクタン、 α -メチル・ナフタレン、エチル・アルコールに於ては粒径による変化がほとんどない。この原因は粒径が小さい場合には発生した燃料蒸気が着火に必要な温度に達することなく自然対流によつて上方の低温空气中に移動するが、粒径が大きい場合には発生した燃料蒸気が横方向に拡つて比較的広い範囲に拡散し、高温の空氣に接する機会が多くなり着火し易くなるためである。しかるに表面温度 θ_s が上昇すると、それに伴つて空氣温度も上昇し、燃料の着火に必要な高温の空氣層が厚くなるために粒径による着火温度の影響が少くなる。

第10図は軽油の消失時間曲線である。モーター・ガソリンも同様な消失時間曲線を示す。す

なわち実用燃料の中、蒸溜燃料は純粋燃料に似た第 10 図のような消失時間曲線を示す。蒸溜燃料は混合燃料であるために定まった沸点がなく、従つて液膜蒸発期間と沸騰蒸発期間の区別がなく、すべて液膜蒸発を行う。すなわち蒸溜燃料の蒸発及び燃焼状態は液膜蒸発期間、遷移期間、球状蒸発期間、球状燃焼期間の 4 現象からなり、それらはそれぞれ最大蒸発率点、ライデンフロスト点、最低着火点の 3 点によつて区分されている。

液膜蒸発期間に於ては、液粒は落下すると凸レンズ状の液膜になり、時間の経過と共に液粒は極めて薄い平たい液膜に拡つて蒸発を完了し、純粋燃料の液膜蒸発期間に於ける凸レンズ状の液膜蒸発は見られなかつた。表面温度 θ_s が上昇するにつれて拡る速度が早くなり、拡る面積が小さくなる。そして表面温度 θ_s が最大蒸発率点 θ_m に近づくとき、液粒は落下と同時にジュジュという音を発生して短時間で蒸発し、液膜状に薄く拡るという現象は見られなくなる。表面温度 θ_s が最大蒸発率点 θ_m に達すると、落下した液粒は液全体を盛り上げ、すぐつぶれて瞬間的に蒸発を完了する。純粋燃料の遷移期間に於ては液粒の分裂がよく見られたが、蒸溜燃料の遷移期間に於ては液粒の分裂が純粋燃料ほど見られず、その量も少かつた。又純粋燃料の消失時間曲線の勾配は遷移期間に於ては正で、表面温度 θ_s の上昇と共に減少してライデンフロスト点で零になり、更に表面温度 θ_s が上昇すると負になつて勾配の変化が急激であるが、蒸溜燃料に於ては勾配の変化が緩やかでライデンフロスト点が純粋燃料ほどはつきりしない。

蒸溜燃料の球状蒸発期間と球状燃焼期間の現象は純粋燃料の場合と全く同じである。



第 11 図 A 重油の消失時間曲線

第 11 図は A 重油の消失時間曲線である。実用燃料の中でも A 重油やモビール・オイルのような残溜油はガソリン、軽油のような蒸溜油と異り、第 11 図のような液体分と固体分とに分れて蒸発及び燃焼する。第 11 図の (1) は液体分の消失時間曲線で、(2) は固体分の消失時間曲線である。残溜油の液粒が高温面に接触するとまず液体分が先に消失し、その後固体分がゆつくりと消失する。液体分

の消失現象には蒸溜油と同様に液膜蒸発期間 $a-c$ 、遷移期間 $c-d$ 、球状蒸発期間 $d-e$ 、球状燃焼期間 $e-f$ の 4 期間があり、各期間はそれぞれ最大蒸発率点 c 、ライデンフロスト点 d 、最低着火点 e の 3 点によつて区分されている。然るに固体分は表面温度 θ_s の上昇と共に指数函数的に減少し、最低着火点 e' で一時不連続になり、その後又指数函数的に減少してある表面温度 θ_s で液体分と合致する。液体分の消失と同時に固体分が消失する時の表面温度 θ_s は、A 重油に於ては 1000°C 以上、モビール・オイルに於ては 580°C 以上である。すなわち A 重油は球状燃焼期間、モビール・オイルは遷移期間に於て液体分と固体分の消失時間が一致する。A 重油の液粒は室温から 40°C までの間に於ては、落下した液粒は盤の凹面の底にたまつてそのまゝの状態ではなかなか蒸発しない。表面温度 θ_s が 40°C 以上になると、落下した液粒はじゅわじゅわと薄い液膜に拡つてまず液体分が先に蒸発し、その後に茶褐色の薄い固体分が残つてそれがなかなか消失しない。表面温度 θ_s を上昇させると、薄い液膜に拡がる速度が早く、拡る面積が狭くなり、液体分が蒸発した後に残る固体分の茶褐色が濃くなる。更に表面温度 θ_s を上げて c 点近くに達すると、液粒は落下と同時にジュジュという音をたて拡る面積が極めて小さくなり、液体分が蒸発した後に残る固体分の色がますます濃くなつて黒色に近くなる。そして固体分の消失時間は段々短くなる。A 重油の場合には蒸溜油に見られるように瞬間的に液粒が蒸発する最大蒸発率点とい

う点がはつきり決まらない。すなわちA重油の場合には表面温度 θ_s が 550°C になると落下した液粒が盛上り、それがつぶれて液膜状で蒸発する。表面温度 θ_s が 570°C になると落下した液粒が半球状に盛上つて、それがつぶれて液膜状で蒸発する。表面温度 θ_s が 570°C 以上に上昇すると盛上の液粒が完全な球に近づいて行き、その球がつぶれて液膜状で蒸発する。それ故に表面温度 θ_s が 570°C で液体分の消失時間が最小になるために、この時の表面温度 θ_s をA重油の最大蒸発率点とした。

純粋燃料、蒸溜燃料に於ては最大蒸発率点に於ける消失時間が $1/10$ 秒のオーダーで表面温度 θ_s が 1000°C の時の消失時間に比べてずーと短い、A重油の場合には最大蒸発率点の消失時間が3秒もかゝり、表面温度 θ_s が 1000°C の時の消失時間より長いために、普通の最大蒸発率点とい概念はA重油には当てはまらない。

表面温度 θ_s が 645°C になると、液粒の液体分はほとんど球状で蒸発し、残りがつぶれて膜状になる。この膜状は大部分固体分から成っている。表面温度 θ_s が 645°C 以上になると液粒の液体分の消失時間が少しずつ短くなるために、 $\theta_s=645^\circ\text{C}$ がライデンフロスト点になり、表面温度 $\theta_s=570\sim 645^\circ\text{C}$ の期間が遷移期間である。純粋燃料や蒸溜燃料に於ては、ライデンフロスト点の消失時間が最大蒸発率点の消失時間の数十倍も長くかゝるにもかゝらず、A重油の場合にはライデンフロスト点の消失時間が最大蒸発率点の消失時間の時間にしてせいぜい0.5秒、倍率にして1.1倍長いだけである。A重油の消失時間曲線は近似的に双曲線となつて純粋燃料や蒸溜燃料のように極大極小のはつきりした特長のある消失時間曲線が得られなかつた。

表面温度 $\theta_s=747^\circ\text{C}$ に達すると液粒が着火し、これ以上の表面温度の期間が球状燃焼期間である。球状燃焼期間でも 1000°C 以下の表面温度では液体分は燃焼している間に全部消失するが、固体分は燃焼終了後もステンレス盤上に膜状に残つて数秒経つて消失する。しかし表面温度 θ_s が 1000°C 以上になると、液粒の液体分も固体分も球状のまま燃焼終了と同時に消失する。

4. 結 論

(1) 純粋燃料の蒸発および燃焼現象には次の5つの異つた状態がある。すなわちそれは液膜蒸発期間、沸騰蒸発期間、遷移期間、球状蒸発期間、球状燃焼期間で、各期間はそれぞれ沸点、最大蒸発率点、ライデンフロスト点、最低着火点によつて区分される。

(2) 純粋燃料の液膜蒸発期間と沸騰蒸発期間に於ては、消失時間 t と粒径 d_0 と高温面の表面温度 θ_s との間に次の関係が成立する。

液膜蒸発期間に於ては

$$t = k_b d_0^{1.5} (\theta_b - \theta_f / \theta_s - \theta_f)^m$$

沸騰蒸発期間に於ては

$$t = k_m d_0^{1.5} (\theta_m - \theta_f / \theta_s - \theta_f)^n$$

(3) 純粋燃料の球状蒸発期間、球状燃焼期間に於てはそれぞれ粒径の2乗と時間の間に次の関係が成立する。

$$d^2 = d_0^2 - C_e t$$

$$d^2 = d_0^2 - C_b t$$

(4) 実用燃料の蒸発および燃焼現象には次の4つの異なる状態がある。すなわちそれは液膜蒸発期間、遷移期間、球状蒸発期間、球状燃焼期間で、各期間はそれぞれ最大蒸発率点、ライデンフロスト点、最低着火点によつて区分される。しかるに残溜燃料のA重油に於ては、液体分が先に蒸発し、固体分が高温面表面に残つて遅れて消失するという2段階の現象を示し、液体分の消失時間曲線は純粋燃料、蒸溜燃料によつて見出された特長のある消失時間曲線を示さない。

(5) 実用燃料中の蒸溜燃料の球状蒸発期間、球状燃焼期間に於ては、純粋燃料と同様に粒径の2乗と時間の間に次の関係が成立する。

$$d^2 = d_0^2 - C_e t$$

$$d^2 = d_0^2 - C_i t$$

- (6) モビール・オイルの蒸発および燃焼現象はA重油と同じ傾向を示した。
- (7) 最大蒸発率点に於ては瞬間的に燃料粒から燃料蒸気を作ることができるために、この点を蒸発および燃焼の実用方面に大いに利用することができる。
- (8) 第1表に液粒が高温面に接触した時の蒸発および燃焼特性を示す。

第 1 表 液粒が高温面に接触した時の蒸発および燃焼特性

名 称	分 子 式	比重 $\gamma \text{ kg/m}^3$	凝固点 $\theta_f \text{ } ^\circ\text{C}$	沸点 $\theta_b \text{ } ^\circ\text{C}$	最大蒸 発率点 $\theta_m \text{ } ^\circ\text{C}$	ライデンフ ロスト点 $\theta_L \text{ } ^\circ\text{C}$	$h_{fs}/\text{mm}^{1.5}$ at $\theta_b \text{ } ^\circ\text{C}$	m	$h_{ms}/\text{mm}^{1.5}$ at $\theta_m \text{ } ^\circ\text{C}$	n	$C_e \text{ mm}^2/\text{s}$ at $\theta_s=450^\circ\text{C}$	$C_e \text{ mm}^2/\text{s}$ at $\theta_s=700^\circ\text{C}$	最低着 火点 $\theta_i \text{ } ^\circ\text{C}$	$C_b \text{ mm}^2/\text{s}$ at $\theta_s=900^\circ\text{C}$	$C_b \text{ mm}^2/\text{s}$ at $\theta_s=1070^\circ\text{C}$
ベンゼン	C_6H_6	880	5.5	80.2	118	195	2.12	2.3	0.13	6.9	1.01	1.55	840	2.00	2.70
n-ヘプタン	C_7H_{16}	683	- 90.6	98.4	126	182	1.75	5.2	0.13	22.6	1.46	2.48	736~ 740	3.40	4.73
iso- オクタン	$(\text{CH}_3)_3\text{C}\cdot\text{CH}_2\cdot\text{CH}\cdot(\text{CH}_3)_2$	696	-108.0	99.0	126	184	1.56	6.0	0.12	23.3	1.53	2.52	798~ 800	4.18	5.23
n-セタン	$\text{C}_{16}\text{H}_{34}$	774	20.0	288.0	323	380	1.33	4.9	0.17	17.3	1.40	2.41	710~ 730	3.53	4.89
α -メチル- ナフタレン	$\text{C}_{10}\text{H}_7(\text{CH}_3)$	1025	- 22.0	243.0	300	420	2.06	5.8	0.15	16.0	1.22	1.80	852	2.20	2.73
エチル・ア ルコール	$\text{C}_2\text{H}_5\cdot\text{OH}$	789	-115.0	78.3	117	185	2.77	6.4	0.16	15.3	0.81	1.13	800~ 803	1.73	2.04
水	H_2O	1000	0	100.0	148	302	7.40	4.0	0.14	8.2	0.30	0.40	—	—	—
モーター・ ガソリン	—	756	—	—	190	330	—	—	—	—	1.24	1.73	800~ 805	3.03	3.61
軽 油	—	830	—	—	350	470	—	—	—	—	1.41	2.39	733~ 746	2.90	3.30
A 重 油	—	860	—	—	570	645	—	—	—	—	—	—	746	—	—
モビール・ オイル	—	941	—	—	550	650	—	—	—	—	—	—	735	—	—

審 査 結 果 要 旨

現在の内燃機関およびガス・タービンでは液体燃料を細かい噴霧として供給しているが、噴霧粒が吸気管壁面等に接触した場合どのような挙動をとるかはまだ不明であつて、これに関する研究で公表されたものはほとんどない。

本論文は種々の粒径の燃料粒をへこレンズ状の金属面上に落とし、金属面の表面温度によつて燃料粒が消失する時間がどのように変るかを測定し、同時に消失するまでの液粒の状態を連続撮影して、この問題に解決を与えたものである。

第1章は序論、第2章は実験装置と方法に関するものであり、第3章は実験結果である。

金属の表面温度が低い時には、液粒はとつレンズ状となつて徐々に揮発し、表面温度が液体の沸点を越えると蒸発が行われる。沸点を数十度越えた時、はげしい核沸とうを行つて液粒は数多くの小粒に分散し、消失時間は極小となる。この温度を越えると液粒は大粒と小粒に別かれ、さらに温度を増すと遂に一つの球となつて球状蒸発を行う。

温度が着火点に達すると球状のまま燃焼を行うが、球状蒸発および球状燃焼中の蒸発速度定数および燃焼速度定数は、高温空气中に浮遊する液粒の場合より、熱面からの熱伝達の影響を受けて大となり、普通数倍となる。

以上の性質はベンゼン、*n*-ヘプタン、*i*-オクタン、*n*-セタン、 α -メチルナフタレン、エチルアルコール等純粹の燃料に共通するものであることが確められ、ガソリン、軽油等の混合燃料でも、傾向はやゝ不鮮明になるが同一現象のあることが求められた。

たゞ重油や滑油のような残留油では、高温面に接すると同時に揮発分と重質分とに分かれることが観測され、極小値や極大値を実際上持たないことが分つた。

以上の研究によつて、従来不明とされた燃料油粒と吸気管または燃焼室壁間の相互作用が明らかになつたほか、イギリスのアームストロング・シドレイ会社のガス・タービン用蒸発燃焼器およびドイツのモイエル氏の蒸発燃焼法のキイポイントも求められた。

したがつて工学上および工業上寄与する所が大きく、本論文は学位論文として合格と認める。